

引文格式:吕学明,肖波,赵青娥,等.含钛高炉渣高温碳化后工艺矿物学分析及除铁试验研究[J].中国有色冶金,2026,55(1):85-91.

LYU Xueming, XIAO Bo, ZHAO Qing'e, et al. Mineralogy analysis and iron removal experiment of titanium-bearing blast furnace slag after high temperature carbonization[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(1): 85-91.

含钛高炉渣高温碳化后工艺矿物学分析及除铁试验研究

吕学明^{1,2}, 肖波³, 赵青娥^{1,2}, 路瑞芳^{1,2}, 郭文明³, 肖虎³

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000;

2. 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000;

3. 攀钢集团攀枝花聚钛科技有限公司, 四川 攀枝花 617000)

[摘 要] 含钛高炉渣高温碳化后的碳化渣全铁(TFe)含量为2.0%~3.5%,用于低温氯化工艺生产钛白粉时,渣中铁与氯气反应生成氯化铁,导致低温氯化淋洗系统堵塞,影响系统的稳定运行,因此本文针对碳化渣进行了工艺矿物学和除铁试验研究,为渣中铁含量控制提供参考。工艺矿物学研究发现,碳化渣主要由硅酸盐玻璃、碳化钛、金属铁、铁氧化物等物相组成,其中硅酸盐玻璃含量为85.71%,碳化钛含量为11.53%,金属铁含量为0.87%,铁氧化物含量为0.53%。金属铁呈圆球状或椭球状嵌布在硅酸盐玻璃中,嵌布粒度粗细不均,一半以上分布在0.08~0.32 mm之间;碳化钛(TiC)主要分布于硅酸盐玻璃相中,并与金属铁等物相连生,粒度主要集中在0.01 mm以下;铁氧化物粒度主要集中在0.04 mm以下。对碳化渣开展湿式磁选除铁试验,结果表明提高磁场强度和增加研磨时间有利于渣中TFe的去除,但也会带来碳化钛(TiC)收得率的降低,当磁场强度达到3 000 Gs、研磨时间超过15 min时,尾矿中TFe含量可降低至1.50%以下,满足低温氯化原料的要求。在实际生产中,可根据生产需要选择不同磁场强度和研磨时间,在有效控制渣中TFe含量的同时,尽量减少碳化钛(TiC)损失。

[关键词] 含钛高炉渣;高温碳化;低温氯化;碳化渣;工艺矿物学;TFe含量;磁场强度;研磨时间

[中图分类号] TF823 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-6103(2026)01-0085-07

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.01.010

0 引言

钒钛磁铁矿是一种富含铁、钛、钒、铬等有价值元素的多金属复杂难处理矿石,全球已探明的储量约为380亿t,主要分布在中国、俄罗斯、南非和新西兰等国家^[1]。在中国,钒钛磁铁矿主要集中在四川和河北等省份,其中四川省攀枝花-西昌(简称攀西)地区钒钛磁铁矿中共伴生的钛资源储量位居世界

第一^[2]。攀西钒钛磁铁矿经高炉炼铁工艺处理后,约一半的钛元素进入高炉渣中,渣中TiO₂含量为20%~25%^[3,4],这类高炉渣被称为含钛高炉渣。

近三十年来,含钛高炉渣的综合利用有三个方向:首先是传统型利用,主要集中在建筑建材领域^[5],生产水泥、混凝土砌块、陶瓷砖等建筑材料,这种利用方式在一定程度上忽视了含钛高炉渣中有效组分,尤其是钛组分的经济价值;其次是新技术利用,包括绿色分离钙钛矿相^[6]、高钛石油压裂支撑剂^[7]、光催化材料^[8]等新领域的应用,目前这些新技术的应用尚处于实验室阶段,距离工业化应用仍有较大差距;最后是含钛高炉渣提钛综合利用,其中攀钢自主研发的“含钛高炉渣高温碳化-低温氯化

[收稿日期] 2025-07-12 [修订日期] 2025-08-11

[录用日期] 2025-08-13 [出版日期] 2026-02-01

[第一作者] 吕学明(1990—),山东济南人,博士研究生,高级工程师,研究方向为含钛固废资源回收利用。

[基金项目] 中央在川高校院所重大科技成果转化项目(2022ZHC-G0123)。

制取 TiCl_4 ”提钛工艺路线尤为突出^[9],该路线能从含钛高炉渣中回收 65% 以上的钛元素,被认为是最具产业化前景的技术路线之一。

在高炉冶炼钒钛磁铁矿的工艺过程中,由于含钛高炉渣的黏度较大,导致渣铁分离困难,高炉渣中通常夹杂 2%~5% 的铁。这部分铁通过高温碳化工艺进入碳化渣,随后在低温氯化工艺中,碳化渣中的铁(包括金属铁和氧化亚铁)与氯气进一步反应生成氯化铁,进而造成低温氯化淋洗系统堵塞,影响低温氯化工艺的稳定运行。因此低温氯化所用的 TiC 炉渣中全铁(TFe)含量一般要求控制在 1.50% 以下。随着高炉含铁炉料中钒钛磁铁矿比例的持续增加,含钛高炉渣中的 TFe 含量也将上升,对低温氯化工艺的稳定运行带来更为不利的影响。为此,本文针对碳化渣开展工艺矿物学和除铁试验研究,得到满足低温氯化工艺要求的除铁工艺参数,研究结果可以为含钛高炉渣“高温碳化-低温氯化制取 TiCl_4 ”工艺中的铁含量控制提供重要参考。

1 含钛高炉渣高温碳化工艺

在含钛高炉渣高温碳化工艺中,主要设备为碳化电炉,主要反应包括熔融高炉渣与碳质还原剂之间的碳化反应,碳化反应中, TiO_2 被还原为 TiC,FeO 被还原为金属 Fe,其余物相保持不变。碳化反应结束后,通过水碎处理得到水碎渣,水碎渣经烘干研磨后得到成品碳化渣,作为下一步低温氯化工艺的原料。在水碎渣烘干研磨工序中,采用气力收粉工艺。由于高含铁 TiC 炉渣含铁量高,无法被研磨至成品碳化渣的粒度且重量大,达不到气力收粉的标准,因此通过出料口被筛分出来,成为工艺废料,作为建材使用。总体来看,含钛高炉渣高温碳化工艺具有流程短、处理量大、钛资源综合利用率高等优点,其工艺流程如图 1 所示。

2 试验原料及方法

2.1 原料

试验原料为取自攀钢集团的碳化渣,水含量一般在 20%~30% 左右,干基成分见表 1。由于受含钛高炉渣中 TFe 含量波动影响,水碎碳化渣中 TFe 含量也有波动,一般情况下 TFe 含量为 2.0%~3.5%,其中金属铁(MFe)占 TFe 的比例为 50%~80%。碳化渣 Fe 元素除金属 Fe 单质外,其余为 Fe^{2+} (分光光度法检测),以 FeO 形式存在。

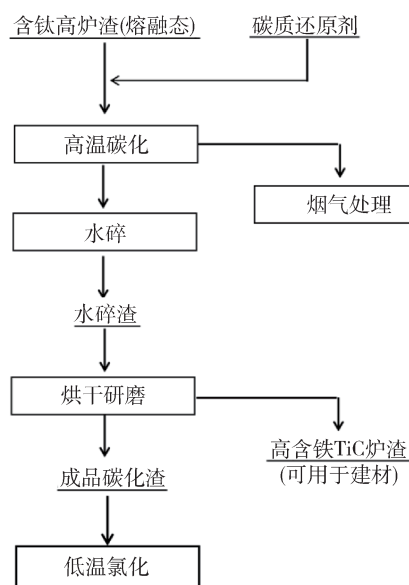


图 1 高温碳化流程

Fig. 1 High temperature carbonization process

表 1 碳化渣的主要成分(干基,质量分数)

Table 1 Main components of carbide slag(dry basis, mass fraction) %

成分	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	TiC	Ti ₂ O ₃	C _f	TFe	FeO
含量	28.35	24.22	8.08	12.85	14.10	4.46	1.56	2.5	1.29

注: C_f表示游离碳。

表 2 碳化渣粒度分布(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of carbide slag (mass fraction) %

粒级/mm	占比/%
>3	9.2
1~3	44.5
0.425~1	25.1
0.15~0.425	9.9
0.074~0.15	5.7
<0.074	5.6

碳化渣粒度分布见表 2,粒度主要集中在 1~3 mm,占比 44.5%,其次为 0.425~1 mm,占比 25.1%,小于 0.074 mm 的占比仅 5.6%。

2.2 试验方法

2.2.1 磁场强度试验

选用湿式磁选方法对碳化渣进行磁选处理,所用湿式磁选设备为电磁湿法多用鼓型磁选机,具体型号为 XCRS-Φ400×240。

1)将碳化渣烘干,每次试验称取 500 g 碳化渣烘干样品,将样品与水配成溶液后(碳化渣质量分数为

25%),通过给矿箱送入湿法鼓型磁选机进行磁选。

2)分别设置磁场强度为1 000 Gs、2 000 Gs、3 000 Gs,进行湿式磁选试验,鼓筒转速设置为20 r/min。

3)样品进入磁选机后,磁性颗粒在磁场中被吸附在鼓筒表面,非磁性颗粒随水流从尾矿口排出。重复用水冲洗,直至尾矿水中无非磁性颗粒(尾矿),结束磁选试验。

4)分别收集磁性颗粒(精矿)和非磁性颗粒(尾矿),烘干后称取质量和分析检测。

2.2.2 研磨时间试验

选用湿式磁选方法对碳化渣进行磁选处理,所用湿式磁选设备为电磁湿法多用鼓型磁选机,具体型号为XCRS-Φ400×240。研磨设备采用棒磨机,具体型号为XMB-Φ200×240。

1)将碳化渣烘干后,每次实验称取1 000 g碳化渣烘干样品与600 ml水混合并搅拌均匀得到碳化渣矿浆,将矿浆送入棒磨机进行湿式研磨,分别研磨9 min、12 min、15 min、25 min。

2)研磨结束后,将矿浆通过标准筛进行筛分,得到不同研磨时间下碳化渣的粒度区别。

3)将不同研磨时间下得到的碳化渣矿浆烘干,每次试验称取500 g碳化渣烘干样品,将样品与水配成溶液后(碳化渣质量分数为25%),通过给矿箱送入湿法鼓型磁选机进行磁选。

4)设置磁场强度为3 000 Gs,进行湿式磁选试验,鼓筒转速设置为20 r/min。

5)样品进入磁选机后,磁性颗粒在磁场中被吸附在鼓筒表面,非磁性颗粒随水流从尾矿口排出。重复用水冲洗,直至尾矿水中无非磁性颗粒(尾矿),结束磁选试验。

6)分别收集磁性颗粒(精矿)和非磁性颗粒(尾矿),烘干后称取质量和分析检测。

2.3 分析及计算方法

1)分析方法。碳化渣的工艺矿物学研究通过矿物自动分析仪系统(MLA)进行深入分析。采用化学分析方法对原渣、磁选精矿及尾矿中的TFe和TiC含量进行测定,其中TiC含量的测定参照文献[10]所述方法,并据此计算TFe的去除率及TiC的收得率。

2)计算方法。TFe去除率和TiC收得率按照式(1)~(3)计算,其中 $M_{\text{原矿}}$ 为原矿质量、 $M_{\text{尾矿}}$ 为尾矿

质量、 $M_{\text{精矿}}$ 为精矿质量、 $TFe_{\text{原矿}}$ 为原矿中TFe的含量、 $TFe_{\text{尾矿}}$ 为尾矿中TFe的含量、 $TiC_{\text{原矿}}$ 为原矿中TiC的含量、 $TiC_{\text{尾矿}}$ 为尾矿中TiC的含量、 $TiC_{\text{精矿}}$ 为精矿中TiC的含量。

$$TFe\text{去除率} = \frac{TFe_{\text{原矿}} \times M_{\text{原矿}} - TFe_{\text{尾矿}} \times M_{\text{尾矿}}}{TFe_{\text{原矿}} \times M_{\text{原矿}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{尾矿 TiC 收得率} = \frac{Tic_{\text{尾矿}} \times M_{\text{尾矿}}}{Tic_{\text{原矿}} \times M_{\text{原矿}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{精矿 TiC 收得率} = \frac{Tic_{\text{精矿}} \times M_{\text{精矿}}}{Tic_{\text{原矿}} \times M_{\text{原矿}}} \times 100\% \quad (3)$$

3 工艺矿物学分析

3.1 碳化渣物相组成分析

采用MLA测定碳化渣的矿物组成及含量,结果见表3。从表3可知,碳化渣主要由硅酸盐玻璃相和碳化钛组成,含少量金属铁、铁氧化物等其他物相。采用MLA系统对碳化渣中碳化钛、金属铁和铁氧化物等物相的嵌布粒度进行测量,具体数据见表4。由表4可知,碳化钛粒度主要集中在0.01 mm以下,铁氧化物粒度主要集中在0.04 mm以下,金属铁嵌布粒度粗细不均,在各粒级均有分布。

表3 碳化渣主要物相组成及含量(质量分数)

Table 3 Main phase composition and content of carbide slag(mass fraction) %

物相	占比/%
碳化钛	11.53
金属铁	0.87
铁氧化物	0.53
硅酸盐玻璃相	85.71
其他	1.36

表4 碳化渣主要物相嵌布粒度(质量分数)

Table 4 The main phase embedding particle size of carbide slag(mass fraction) %

粒级/mm	碳化钛粒度 占比/%	金属铁粒度 占比/%	铁氧化物粒度 占比/%
0.32~0.16	0.27	33.07	/
0.16~0.08	2.18	19.51	8.24
0.08~0.04	9.55	13.26	13.25
0.04~0.01	21.86	21.65	52.38
<0.01	66.14	12.51	26.13
合计	100.00	100.00	100.00

3.2 碳化渣物相微观形貌

图2所示为碳化渣的微观形貌,从图中可以看出,浅灰色区域为TiC,主要呈微细粒圆粒状、次细粒

圆粒状分布于硅酸盐玻璃相中,并与金属铁等物相连生。碳化钛的能谱扫描结果见表5,主要由Ti、C两种元素组成,还含有少量Mg、Al、Si、Ca等元素。

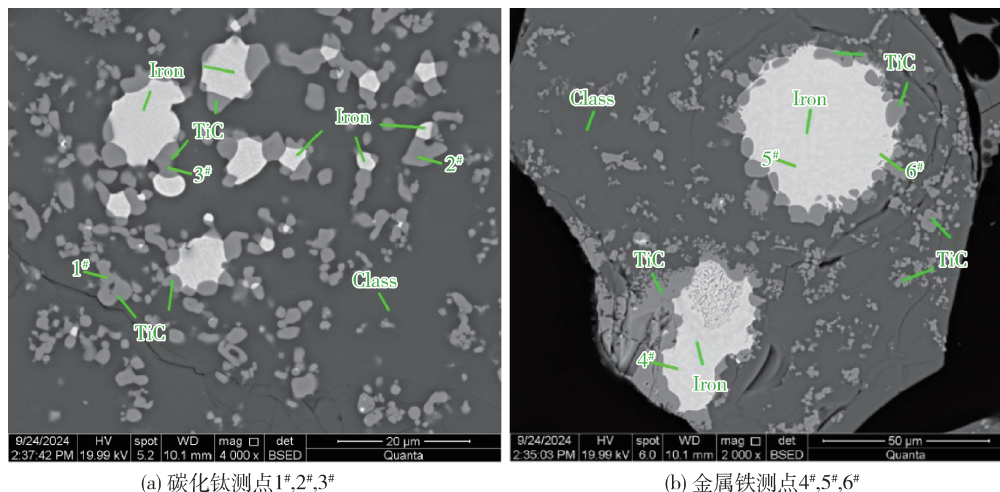


图2 碳化渣微观形貌

Fig. 2 Microscopic morphology of carbide slag

表5 碳化钛能谱分析结果(质量分数)

测点	Ti	C	Mg	Al	Si	Ca
1 [#]	80.66	6.69	2.62	2.86	3.25	3.92
2 [#]	80.12	7.04	2.68	2.87	3.34	3.95
3 [#]	79.94	7.86	2.58	2.95	3.37	3.30
平均	80.24	7.20	2.63	2.89	3.32	3.72

表6 金属铁能谱分析结果(质量分数)

测点	Fe	Si	Mn	Al	P	Ca	Ti	V	Cr
4 [#]	93.50	3.87	1.29	0.00	0.00	0.17	0.93	0.23	0.00
5 [#]	91.76	2.21	3.11	0.00	0.15	0.21	1.05	0.54	0.97
6 [#]	93.99	1.47	2.08	0.15	0.42	0.24	0.75	0.15	0.75
平均	93.08	2.52	2.16	0.05	0.57	0.21	0.91	0.31	0.57

亮白色区域为金属Fe,能谱分析结果见表6,主要含有Fe、Si、Mn及其他少量元素。金属铁嵌布粒度粗细不均,多数金属铁呈细粒至微细圆球状或椭球状嵌布在硅酸盐玻璃中,在金属Fe周围有少量TiC,两者紧密相连。在含Ti的Fe-C相图上,液态金属Fe可以溶解约0.3%的Ti及少量碳,在降温冷却过程中,部分Ti可能在Fe的边部及内部晶粒的空隙处析出。由于金属Fe和少量TiC相连生,因此在磁选去除Fe的同时必然损失部分TiC^[11]。

图3所示为硅酸盐玻璃相及铁氧化物的微观形貌图。从图3(a)可看出,硅酸盐玻璃相是碳化渣中最主要的物相,其总含量超过85%,能谱分析结果见表7,主要为Ca、Si、Mg、Al、O等元素组成。铁氧化物在碳化渣中含量较少,如图3(b)所示,其能谱分析结果见表8,从原子百分比来看,主要由Fe元素和

O元素组成,且原子百分比基本为1:1,含有少量Si、S等杂质元素,推测铁氧化物为FeO,与上文碳化渣化学成分分析中铁氧化物主要为FeO一致。

4 碳化渣湿法除铁试验研究

4.1 磁场强度试验

碳化渣分别在1 000 Gs、2 000 Gs、3 000 Gs的磁场强度下进行湿法除铁试验,碳化渣质量为500 g,TFE含量为2.36%,TiC含量为14.20%,磁选结果见表9。

从表9可以看出,随着磁场强度的增加,TFE去除率逐渐提高,由1 000 Gs时的22.37%提高到3 000 Gs时的33.23%,但尾矿中TFE含量均未低于1.50%,不满足低温氯化原料要求;尾矿中的TiC收得率略有下降,由1 000 Gs时的98.20%降低到

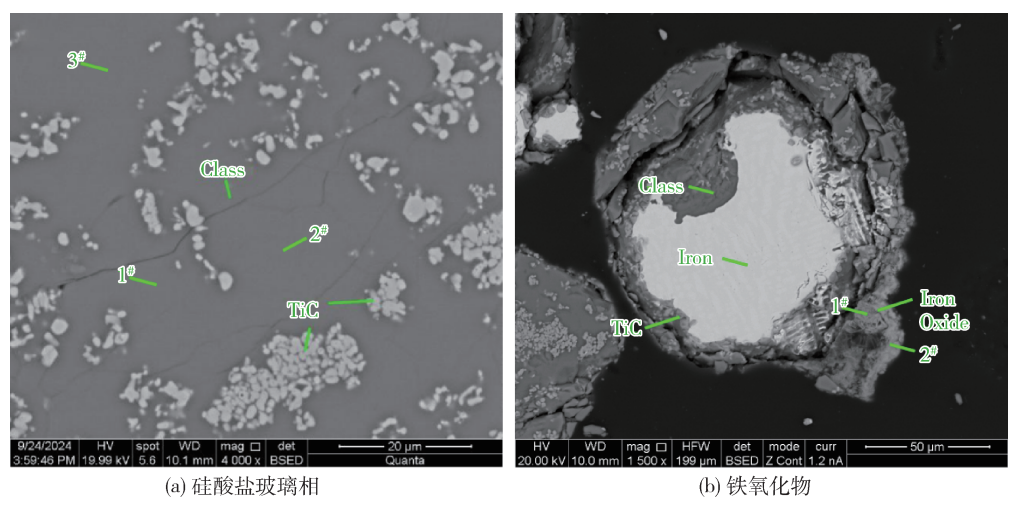


图3 硅酸盐玻璃相及铁氧化物能谱点分析图

Fig. 3 Analysis of energy spectrum points of silicate glass phase and iron oxide

表7 硅酸盐玻璃相能谱分析结果(质量分数)

Table 7 Energy spectrum analysis results of silicate glass phase (mass fraction) %						
测点	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti
1 [#]	48.45	15.57	9.28	10.93	13.35	2.42
2 [#]	55.78	6.09	4.60	12.55	20.98	0
3 [#]	57.04	6.77	6.21	14.34	13.23	2.41
平均	53.76	9.48	6.70	12.61	15.85	1.61

表8 铁氧化物能谱分析结果

Table 8 Energy spectrum analysis results of iron oxide								
测点	元素组成与含量 (质量分数)/%				元素组成与含量 (原子比)/%			
	Fe	O	Si	S	Fe	O	Si	S
1 [#]	70.11	23.04	1.57	5.29	43.05	49.38	1.91	5.66
2 [#]	70.84	22.75	1.46	4.95	45.74	47.68	1.83	4.75
平均	70.48	22.90	1.52	5.12	44.40	48.53	1.87	5.21

表9 碳化渣湿式磁选除铁结果

Table 9 Results of wet magnetic separation for iron removal from carbide slag								
组别	磁场强度/Gs	产品	质量/g	产率/%	TFeI/%	TiC/%	TFe去除率/%	TiC收得率/%
No. 0	/	原矿 ^a	500.00	100.00	2.36	14.20	/	/
		精矿 ^a	17.85	3.57	14.79	7.18	/	1.80
No. 1	1 000	尾矿 ^a	482.15	96.43	1.90	14.46	22.37	98.20
		精矿 ^a	29.85	5.97	10.39	5.85	/	2.46
No. 2	2 000	尾矿 ^a	470.15	94.03	1.85	14.73	26.29	97.54
		精矿 ^a	41.90	8.38	9.36	5.02	/	2.96
No. 3	3 000	尾矿 ^a	458.10	91.62	1.72	15.04	33.23	97.04

3 000 Gs时的97.04%。在碳化渣微观形貌研究中可知,在金属Fe周围有少量TiC,两者紧密相连,且TiC具有弱磁性,随着磁场强度的增加,金属Fe周围的TiC更多被磁选入精矿中,导致尾矿中TiC收得率略有下降。

4.2 研磨时间试验

采用研磨设备分别研磨碳化渣9 min、12 min、15 min、25 min,然后在3 000 Gs的磁场强度下,进行碳化渣的湿法除铁试验,碳化渣质量为500 g,原矿中TFe含量为2.36%,TiC含量为14.20%,磁选结果见表10。

从表10可以看出,随着研磨时间的增加,碳化渣粒度小于0.074 mm的比例逐步增加,TFe去除率逐渐提高,由研磨9 min时的35.13%提高到研磨25 min时的46.07%。研磨时间在15 min以上时,尾矿中TFe含量降低到1.50%以下,满足低温氯化原料要求;尾矿中的TiC收得率略有下降,由研磨9 min时的96.82%降低到研磨25 min时的95.52%。

表10 碳化渣磨后湿式磁选除铁结果

Table 10 Results of wet magnetic separation for iron removal after grinding of carbide slag

组别	磁场强度/Gs	研磨时间	产品	质量/g	产率/%	TFe/%	TiC/%	TFe去除率/%	TiC收得率/%
No. 0	3 000	/	原矿	500.00	100.00	2.36	14.20	/	/
No. 1	3 000	9 min(<0.074 mm 29%)	精矿	15.55	3.11	26.66	14.51	/	3.18
			尾矿	484.45	96.89	1.58	14.19	35.13	96.82
No. 2	3 000	12 min(<0.074 mm 36%)	精矿	13.85	2.77	31.49	18.06	/	3.52
			尾矿	486.15	97.23	1.53	14.09	36.97	96.48
No. 3	3 000	15 min(<0.074 mm 42%)	精矿	13.65	2.73	34.43	21.33	/	4.10
			尾矿	486.35	97.27	1.46	14.00	39.82	95.90
No. 4	3 000	25 min(<0.074 mm 66%)	精矿	14.20	2.84	38.28	22.41	/	4.48
			尾矿	485.80	97.16	1.31	13.96	46.07	95.52

在碳化渣微观形貌研究中可知,大量TiC颗粒分布于硅酸盐玻璃相中,在研磨过程中,TiC与硅酸盐玻璃相分离,研磨时间越长,分离越彻底。在同一磁场强度下,弱磁性TiC与硅酸盐玻璃相分离越彻底,越容易被磁选入精矿中,导致尾矿中TiC收得率略有下降。

通过碳化渣直接湿式磁选和碳化渣研磨后湿式磁选试验研究发现,提高磁场强度和增加研磨时间有利于渣中TFe的去除,但也会带来尾矿中TiC收得率的降低。磁场强度达到3 000 Gs、研磨时间15 min以上时,尾矿中TFe含量降低到1.50%以下,满足低温氯化原料要求。在实际生产中,可根据生产需要选择不同磁场强度和研磨时间,在控制渣中TFe含量的同时尽量减少TiC损失。

5 结论

针对“含钛高炉渣高温碳化-低温氯化制取TiCl₄”提钛工艺中低温氯化要求的原料中TFe含量控制在1.50%以下的目标,本研究以含钛高炉渣高温碳化后的碳化渣为原料,进行了工艺矿物学分析,并对除铁工艺的磁场强度和研磨时间参数进行了试验,得到以下主要结论。

1)碳化渣主要由硅酸盐玻璃、碳化钛、金属铁、铁氧化物等物相组成,其中硅酸盐玻璃含量85.71%,碳化钛含量11.53%,金属铁含量0.87%,铁氧化物含量0.53%。碳化钛粒度主要集中在0.01 mm以下,铁氧化物粒度主要集中在0.04 mm以下,金属铁嵌布粒度粗细不均,一半以上分布在0.08~0.32 mm之间。

2)碳化渣中金属铁呈细粒至微细圆球状或椭

球状嵌布在硅酸盐玻璃中,TiC主要呈微细粒圆粒状、次细粒圆粒状分布于硅酸盐玻璃相中,并与金属铁等物相连生,且TiC具有弱磁性,因此在磁选去除Fe的同时必然损失部分的TiC。

3)碳化渣直接进行湿式磁选除铁试验,随着磁场强度的增加,TFe去除率逐渐提高,由1 000 Gs时的22.37%提高到3 000Gs时的33.23%,但尾矿中TFe含量均未低于1.50%,不满足低温氯化原料要求。对碳化渣研磨不同时间后进行湿式磁选除铁试验,磁选强度为3 000 Gs、研磨时间15 min以上时,尾矿中TFe含量降低到1.50%以下,满足低温氯化原料要求。

4)碳化渣磁选除铁试验表明,提高磁场强度和增加研磨时间有利于渣中TFe的去除,但也会带来TiC收得率的降低。在实际生产中,可根据生产需要选择不同磁场强度和研磨时间,在控制渣中TFe含量的同时尽量减少TiC损失。

[参考文献]

- [1] 常福增,赵备备,李兰杰等. 钕铁钕矿提钕技术研究现状与展望[J]. 钢铁钕矿, 2018,39(5):71-78.
CHANG Fuzeng, ZHAO Beibei, LI Lanjie, et al. Research status and prospect of vanadium extraction from vanadium titanomagnetite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39 (5) : 71-78.
- [2] 杨绍利, 马兰, 王军等. 攀西钛资源综合利用技术应用现状及发展方向[J]. 中国有色冶金, 2024,53(6):2-12.
YANG Shaoli, MA Lan, WANG Jun, et al. Application status of comprehensive utilization technologies of titanium resources in Panxi[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(6):2-12.
- [3] WANG Dongsheng, LV Xueming, HOU Yanqing. Postmortem analysis of MgO-C bricks used in smelting furnace for fabricating TiC-bearing slag [J]. Journal of Materials Research and

- Technology, 2024, 31:1171-1183.
- [4] 刘松利, 杨绍利. 攀枝花高钛型高炉渣综合利用研究现状[J]. 轻金属, 2007(7):48-50.
LIU Songli, YANG Shaoli. Present state and perspectives of complex utilization on Panzhihua BF slag[J]. Light Metal, 2007(7):48-50.
- [5] 王怀斌, 范付忠, 郝建璋, 张继东等. 高钛高炉渣在混凝土中的作用机理[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(3):48-53.
WANG Huaibin, FAN Fuzhong, HAO Jianzhang, Zhang Jidong, et al. Action mechanism of high titanium BF slag in concrete[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(5): 71-78.
- [6] 隋智通, 郭振中, 张力等. 含钛高炉渣中钛组分的绿色分离技术[J]. 材料与冶金学报, 2006, 5(2):93-97.
SUI Zhitong, GUO Zhenzhong, ZHANG Li, et al. Green separation technique of Ti component from Ti-bearing blast furnace slag[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2006, 5(2):93-97.
- [7] 徐梓馨. 高钛型高炉渣风淬改性及其应用探索[D]. 绵阳:西南科技大学, 2023.
XU Zixin. Air-quenching high titanium blast furnace slag and its application exploration[D]. Mian Yang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [8] 王鑫博, 王洋, 张叶等. Ce掺杂含钛高炉渣制备光催化材料及其性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2025, 53(4): 58-65.
WANG Xinbo, WANG Yang, ZHANG Ye, et al. Study on preparation of photocatalytic material by Ce doping in titanium-containing blast furnace slag and its properties[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2025, 53(4): 58-65.
- [9] 黄家旭, 杨仰军, 陆平等. 攀钢碳化高炉渣低温氯化试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 12-15+50.
HUANG Jiaxu, YANG Yangjun, LU Ping, et al. Research on low-temperature chlorination process of Pangang carbonized slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2011, 32(4): 12-15, 50.
- [10] 郑小敏. 碳化渣中碳化钛测定方法研究[J]. 冶金分析, 2012, 32: 1006-1010.
ZHENG Xiaomin. Study on the determination method of titanium carbide in carbide slag [J]. Metallurgical Analysis, 2012, 32: 1006-1010.
- [11] 王东生. 含TiC炉渣除铁试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 87-91.
WANG Dongsheng. Experimental study of Fe removal from TiC-containing slag [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4): 87-91.

Mineralogy analysis and iron removal experiment of titanium-bearing blast furnace slag after high temperature carbonization

LYU Xueming^{1,2}, XIAO Bo³, ZHAO Qing'e^{1,2}, LU Ruifang^{1,2}, GUO Wenming³, XIAO Hu³

(1. State Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Vanadium and Titanium Resources, Panzhihua 617000, China;

2. Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China;

3. Panzhihua Juti Technology Co., Ltd., Pangang Group, Panzhihua 617000, China)

Abstract: The total iron (TFe) content of carbide slag is 2.0%-3.5%, when used in the low-temperature chlorination process to produce titanium dioxide, the iron in the slag reacts with chlorine gas to form ferric chloride, which blocks the low-temperature chlorination rinsing system and affects the stability and smooth operation of the system. Therefore, this paper conducted process mineralogy and iron removal experiments on carbide slag to provide a reference for the control of iron content in slag. Through the study of process mineralogy, it was found that carbide slag is mainly composed of silicate glass (85.71%), titanium carbide (11.53%), metallic iron (0.87%), and iron oxide (0.53%). Metallic iron is embedded in silicate glass in a spherical or ellipsoidal shape. Its particle size distribution is uneven, more than half distributed between 0.08 mm and 0.32 mm; TiC is mainly distributed in the silicate glass phase and coexists with metal iron and other substances. Its particle size is primarily below 0.01 mm; The particle size of iron oxide is primarily below 0.04 mm. Wet magnetic separation experiments were conducted to remove iron from carbide slag. The results showed that increasing the magnetic field intensity and grinding time was beneficial for the removal of TFe from the slag, but also resulted in a decrease in the recovery of TiC. When the magnetic field intensity reaches 3 000 Gs and the grinding time is more than 15 min, the TFe content in the tailings is reduced to less than 1.50%, which meets the requirements for low temperature chlorination raw materials. In the actual production, different magnetic field intensities and grinding times can be selected according to the production needs to control the TFe content in the slag while minimizing the TiC loss.

Key words: titanium-bearing blast furnace slag; high-temperature carbonization; low-temperature chlorination; carbide slag; process mineralogy; total iron content; magnetic field intensity; grinding time